



**Technische
Universität
Braunschweig**

Projektarbeit

Experiment am D-förmigen Stumpfkörper

**Nora M. Bierwagen
Tim Gotzel
Amiriman Kianfar
Kebria Kiani
Florian Timm**

Ausgegeben: Institut für Strömungsmechanik
Institutsleiter: Prof. Dr.-Ing. R. Radespiel
Technische Universität Braunschweig

Betreuer: M.Sc. Philipp Oswald, (TU Braunschweig)

Veröffentlichung: Monat Jahr

Zusammenfassung

evtl. eine Kurzzusammenfassung
Ist das notwendig?

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	v
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	2
2.1 Stumpfkörperaerodynamik (TG)	2
2.2 Coandă-Effekt (TG)	2
2.3 Aktive Strömungsbeeinflussung (NB)	2
3 Versuchsvorbereitung (NB)	6
3.1 Stumpfkörper	6
3.2 Rotierende Walzen	7
4 Widerstandsbestimmung	12
4.1 mathematisches Modell	12
4.2 Implementierung	12
5 Windkanalversuche	13
5.1 Windkanal	13
5.2 Versuchsaufbau	13
5.3 Messeinrichtung	13
5.4 Versuchsdurchführung	13
6 Versuchsauswertung	14
6.1 Messdaten	14
6.2 Vergleich mit Erwartungen	14
6.3 Vergleich zum Modell ohne Walzen	14
6.4 Effizienzbetrachtung	14
7 Fazit	15
Literaturverzeichnis	16
Abbildungsverzeichnis	17
Tabellenverzeichnis	18
A Technische Zeichnungen (NB, TG)	19
B Messreihe	23

Nomenklatur

Lateinische Bezeichnungen

Str Strouhal-Zahl

Griechische Bezeichnungen

Indizes

Abkürzungen

NB Nora M. Bierwagen

TG Tim Gotzel

AK Amiriman Kianfar

KK Kebria Kiani

FT Florian Timm

MATLAB kommerzielle Software zur Lösung mathematischer Probleme

rpm Umdrehungen pro Minute

Kapitel 1

Einleitung

kurze Einleitung Stumpfkörper
aufbauend auf Masterarbeit
Ziel der Arbeit

Da es sich bei diesem Dokument um eine Projektarbeit handelt, an der insgesamt fünf Personen mitgewirkt haben, stehen hinter jeder Kapitel- bzw. Unterkapitelüberschrift die Initialen des Autors. In Tabelle 1.1 ist eine Aufschlüsselung der Initialien gegeben.

Name	Initialien
Nora M. Bierwagen	NB
Tim Gotzel	TG
Amiriman Kianfar	AK
Kebria Kiani	KK
Florian Timm	FT

Tabelle 1.1: Initialien

Kapitel 2

Grundlagen

2.1 Stumpfkörperaerodynamik (TG)

2.2 Coandă-Effekt (TG)

2.3 Aktive Strömungsbeeinflussung (NB)

Stumpfe Körper haben meist ein abruptes Ende, an dem sich strömungsmechanische Nachteile ergeben. Diese versucht man durch Anpassung der Geometrie des Körpers oder durch die strukturelle Veränderung des Todwassers auszugleichen. Ziel ist es den Basisdruck anzuheben und darüber den Druckwiderstand des Körpers zu verringern [4].

Im Rahmen dieser Arbeit wird sich auf eine aktive Strömungsbeeinflussung konzentriert, weshalb im folgenden einige bis jetzt realisierte Verfahren vorgestellt werden.

Bearman [4] hat als einer der ersten die aktive Strömungsbeeinflussung nachgewiesen. Abbildung 2.1 zeigt das verwendete Stumpfkörpermodell. Dabei ist als Besonderheit auf die poröse Basis hinzuweisen, durch die zusätzlich Luft am Ende des Körpers ausgestoßen wurde.

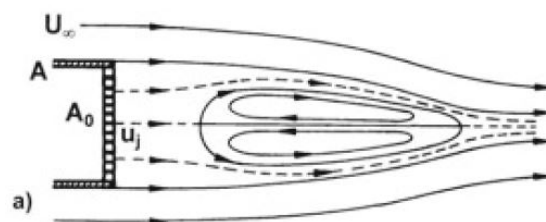


Abbildung 2.1: Stumpfkörper mit Ausblasung von Bearman [4]

Die austretende Luft sorgt dafür, dass die Strömungsablösung vom Körperende weggeschoben wurde. Durch die erst später stattfindende Verwirbelung, fällt der Widerstand des Körpers ab.

Geropp [2] hat Experimente zur Einblasung am Ende eines Kraftfahrzeuges über zwei Schlitze mit Nutzung des Coandă-Effekts gemacht (Abbildung 2.2).

Ergebnis ist, dass die Ausblasung bei hohen Geschwindigkeiten erfolgen muss, um die Grenzschicht zu beeinflussen. Durch den Coandă-Effekt wird die eingeblasene Luft in das Todwasser umgelenkt, wo sie wieder abgesagt wird. Dadurch wird der Druck hinter dem Fahrzeug erhöht und der Gesamtwiderstand verringert. Die Experimente haben gezeigt, dass eine Druckerhöhung von

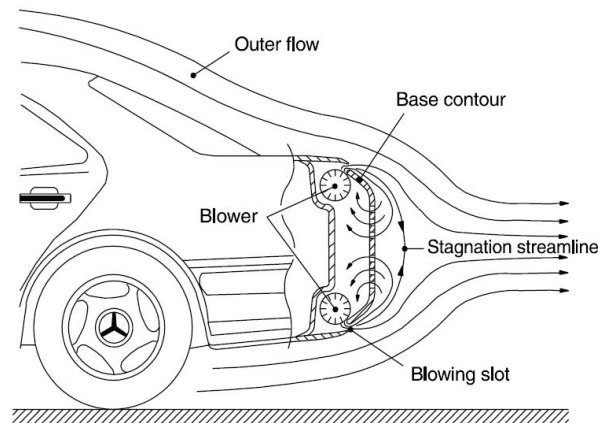


Abbildung 2.2: Stumpfkörper mit Ausblasung von Geropp [2]

50% und eine Widerstandsverringerung um 10% möglich ist. Außerdem wurde ein Energievorteil für moderate Ausblasgeschwindigkeiten mathematisch bestimmt.

In [1] wurde zusätzlich zu den vorherig beschriebenen Verfahren die Ausblassung gepulst durchgeführt. Dabei soll der Einfluss von Frequenz und Amplitude auf das Widerstandsverhalten untersucht werden.

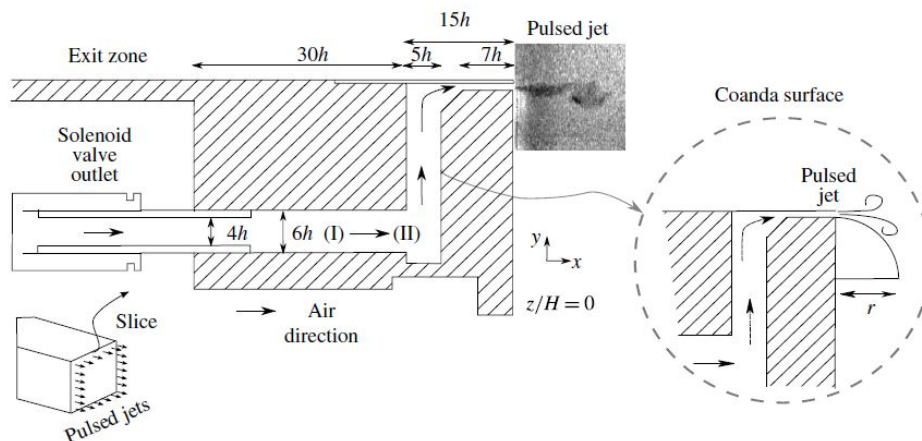


Abbildung 2.3: Ausblasung von Barros [1]

In Abbildung 2.3 ist der schematische Aufbau der gepulsten Ausblasung dargestellt. Diese wird über Ventile realisiert, die eine Rechteckkurve mit einem duty cycle (weiter Erläuterung in Kapitel 3.2) von 40% erzeugen. Direkt unter der Ausblasestelle wird zusätzlich noch eine Coandã-Fläche befestigt.

Mit steigenden Frequenzen, aber auch mit einer steigenden Amplitude, wurde eine Umlenkung der Grenzschicht beobachtet. Über eine gepulste Einblasung, nahe der natürlichen Ablösefrequenz der Strömung, konnte der Widerstand am meisten (10%) gesenkt werden. Bei zusätzlicher Nutzung der Coandã-Fläche kommt man sogar auf 20% Widerstandsreduzierung.

Modi [6] versucht durch drehende Zylinder an einem Truck den Widerstand zu reduzieren.

Dazu sind bei den ersten Windkanalversuchen die Zylinder angeordnet, wie in Abbildung 2.4 dargestellt. Bei dem ersten Versuch wird die Rauigkeiten der Zylinder variiert. Es gibt einen glatten Zylinder, einen mit einer Rauigkeit von 40 und einen mit 80. Außerdem wird das Verhältnis der Geschwindigkeiten der Zylinder U_c bzgl. der Anströmgeschwindigkeit U für

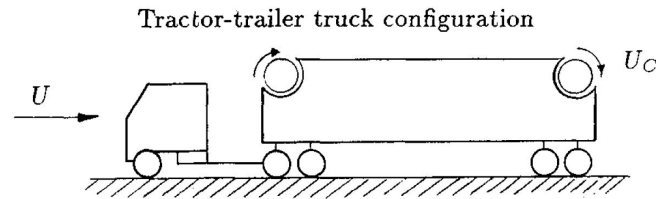


Abbildung 2.4: Truckmodell von Modi [6]

alle drei Fälle variiert. Daraus ergeben sich die Widerstandsreduktionen in Tabelle 2.1.

Zylinder	Widerstandsreduktion [%]	U_c/U
glatt	5	2
Rauhigkeit 80	10	2.1
Rauhigkeit 40	13	2.1

Tabelle 2.1: Widerstandsreduktion bei Modi

Da der hintere Zylinder keinen Impuls in die Grenzschicht einbringen kann und die Versuche das auch bestätigt haben, wurde ein zweites Experiment mit anderer Konfiguration durchgeführt. Dabei wurde ein Zylinder mit spiralförmiger Rille in der Oberfläche und einer mit einer Vielkeil-Verzahnung, deren Rillen parallel zur Drehachse verlaufen, verwendet. Der erste Zylinder sitzt wie in Abbildung 2.4 dargestellt, der zweite wurde ans Ende des ersten Drittels der Truckoberseite positioniert.

Der spiralförmige Zylinder erzielte das gleiche Ergebnis, wie der Zylinder mit einer Rauigkeit von 40 im ersten Experiment. Der Vielkeil-Verzahnungs Zylinder hat allerdings einen großen Einfluss auf den Widerstand. Wenn man nur den vorderen Zylinder betrachtet können 29% Reduktion erreicht werden, beide erreichen bis zu 41%.

Alle bisher vorgestellten Verfahren haben nur eine Steuerung des Vorgangs betrachtet. In [3] wird jetzt zusätzlich eine Regelung des Mechanismus der Strömungsbeeinflussung beachtet. Dabei möchte man äußere Störungen mit berücksichtigen, die zum Beispiel sich gegenseitig beeinflussende Kraftfahrzeuge aufeinander haben.

Im Rahmen der Arbeit wurden unterschiedliche Körper (Abbildung 2.5) analysiert.

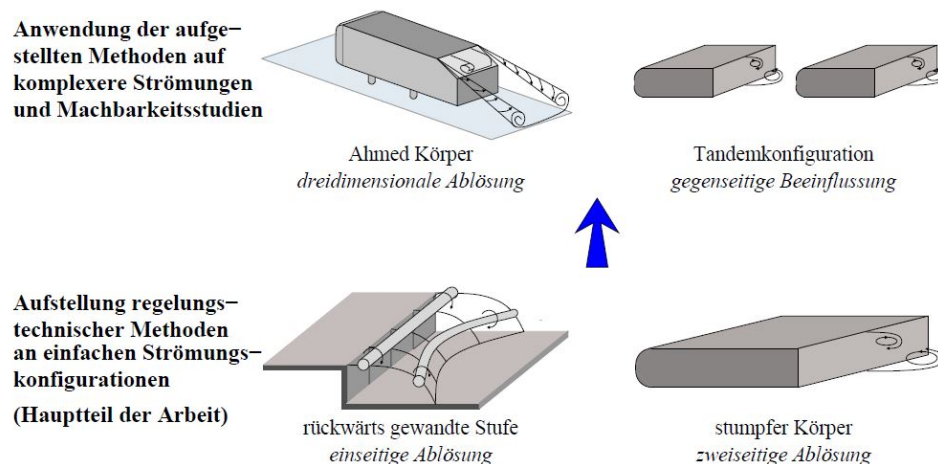


Abbildung 2.5: betrachtete Modelle für Auslegung der Regelung [3]

An der rückwärts gewandten Stufe wurde erfolgreich die Wideranlegelänge über einen segmentier-

ten Schlitz an der Stufenkante geregelt. Außerdem konnte eine Unterdrückung von Störungen erreicht werden. Das Ganze wurde über eine Robuste Regelung realisiert.

Am stumpfen Körper wurde mit Hilfe einer Phasenregelung an Ober- und Unterseite eine Widerstandsreduzierung von bis zu 15% erreicht.

Die Tandemkonfiguration wurde im Rahmen einer Machbarkeitsstudie untersucht und für zukünftige Arbeiten als sinnvoll betrachtet. Dabei geht es um die Störeinflüsse, die der erste Körper auf den zweiten hat und wie dieser die Störung über eine Regelung beseitigen kann, sodass auch beim zweiten Körper eine Widerstandsreduzierung möglich ist.

Kapitel 3

Versuchsvorbereitung (NB)

Bevor der Versuch im Windkanal stattfinden kann, muss das Experiment vorbereitet werden. Dazu wird in diesem Kapitel der verwendete Stumpfkörper genauer vorgestellt, sowie die Konstruktion der rotierenden Walzen.

3.1 Stumpfkörper

Der D-förmige Stumpfkörper war im Rahmen dieser Arbeit vorgegeben, da er schon Bestand und weiter verwendet werden sollte.

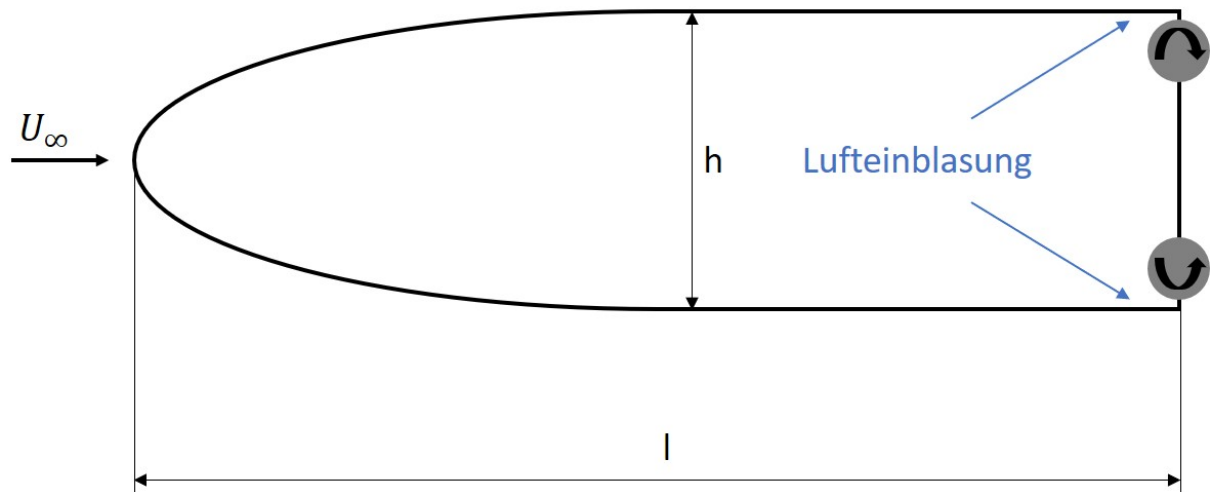


Abbildung 3.1: schematische Darstellung des Versuchsmodells

Abbildung 3.1 zeigt eine schematische Zeichnung des Querschnitts des hier verwendeten Körpers. Die Modellhöhe h beträgt 53.4 mm. Ein weiterer wichtiger gegebener Modell-Parameter ist eine Stouhal-Zahl von 0,23 (nähere Erläuterung in Kapitel 3.2).

Am rechten Ende des Körpers befinden sich zwei schematische Kreise, welche die rotierenden Walzen darstellen. Die Pfeile in den Kreisen geben die Drehrichtung an. Über die drehenden Walzen wird die Luft am Ende des Körpers in die Strömung eingeblasen. Eine genauere Beschreibung des Walzenaufbaus ist im folgenden Kapitel (Kapitel 3.2) gegeben.

Die rotierenden Walzen sind jeweils auf einer Welle gelagert und werden von Elektromotoren angetrieben. Die Elektromotoren haben eine maximale Drehrate von 3650 Umdrehungen pro Minute und eine minimale Drehrate von um die 100 Umdrehungen pro Minute.

3.2 Rotierende Walzen

Die rotierenden Walzen erfüllen die Aufgabe, der gepulsten Einblasung in die Strömung am Ende des Stumpfkörpers.

Die Walzen bestehen aus einer Aluminium Innenwelle und einem mit Presspassung verbundenen Teflonrohr. In dem Teflonrohr ist die entscheidende Zahngeometrie eingebracht.

Für Konstruktion des Teflonrohrs mussten folgende Aspekte betrachtet werden:

1. Zahnform
2. Zähnezahl
3. Zahnöffnung

Als Erstes wird auf der Zahnform näher eingegangen. Diese hat Auswirkungen auf das gepulste Signal, das in die Strömung eingeführt wird. Als Grundlagen für die Signalform wurden folgende mathematische Funktionen (Abbildung 3.2) betrachtet.

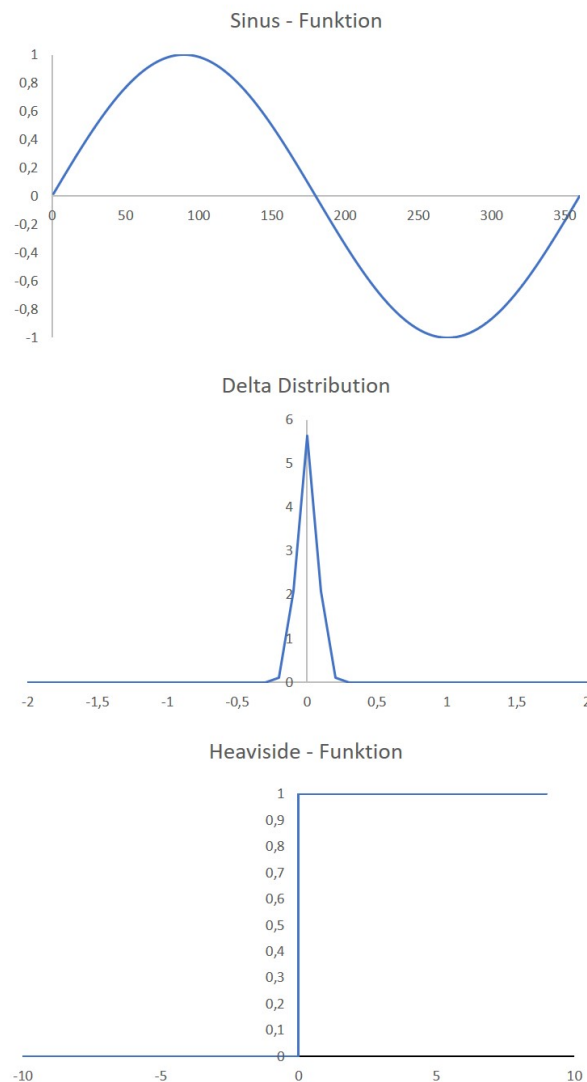


Abbildung 3.2: mathematische Funktionen für Zahnform

Für die Sinus Funktion eignet sich eher eine andere Form der Strömungsanregung, als die der drehenden Walzen. Diese kann besser dargestellt werden über einen Null-Netto-Massenstrom-

Jet-Aktuator [7] oder einen Lautsprecher. Beide funktionieren über eine schwingende Membran, welche die Strömung anregt.

Ein Dirac-Impuls ist eine kurze Anregung der Strömung. Die Zeit in der die Luft in die Strömung eingeblasen wird ist kurz im Vergleich zu der Zeit in der keine Anregung stattfindet. Damit könnte es zu einer nicht ausreichend großen Anregung kommen, die den gewünschten Effekt nicht induziert.

Eine Heaviside Funktion stellt ein eindeutiges Signal dar, das entweder vollständig geschlossen oder vollständig geöffnet ist. Somit ist eine klare Definition des Zustands möglich.

Bei der entgeltigen Wahl eines Signals ist der fertigungstechnische Aspekt ein weiterer wichtiger Parameter, der in diesem Fall die Wahl des Signals entschieden hat. Als finales Wellendesign wurden die zwei Wellen in Abbildung 3.3 gefertigt. Diese wurden gewählt, da eine Fräsbearbeitung des Teflonrohrs zu Strömungsmechanisch ungünstigen Effekten geführt hätte. Der Fräser hat immer eine endliche Breite, sodass die Strömung durch die eventuell minimal auftretenden Kanten zwischen den einzelnen Fräsbahnen gestört werden könnte. Somit wurde sich für eine Fertigung auf der Drehmaschine entschieden. Dabei wurden die Zahntäler über eine exzentrische Einspannung erreicht. Die Wahl für zwei Wellen wird im folgenden des Kapitels näher betrachtet, führt aber grundlegend auf zwei unterschiedliche Experimente zurück.

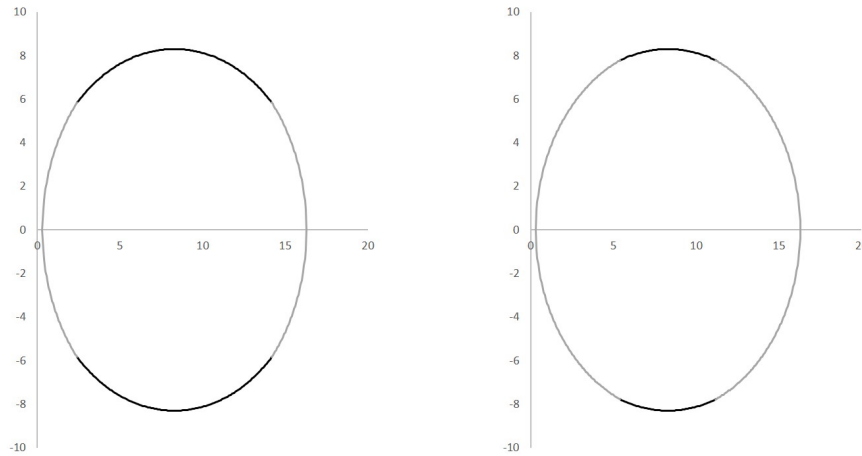


Abbildung 3.3: Querschnitt durch die finalen Walzen

Die Walzen Formen lassen sich über mehrere Kreisfunktion darstellen (mehrere Farben in Abbildung 3.3). Das linke Walze kann beschrieben werden über Gleichung 3.1.

$$\begin{aligned} f_1(x) &= \pm \sqrt{9.15^2 - (x - 9.45)^2} \quad x \in [0.3; 2.42] \\ g_1(x) &= \pm \sqrt{8.3^2 - (x - 8.3)^2} \quad x \in [2.42; 14.18] \\ h_1(x) &= \pm \sqrt{9.15^2 - (x - 7.15)^2} \quad x \in [14.18; 16] \end{aligned} \quad (3.1)$$

Die rechte Walze kann beschrieben werden über Gleichung 3.2.

$$\begin{aligned} f_2(x) &= \pm \sqrt{8.48^2 - (x - 8.78)^2} \quad x \in [0.3; 5.39] \\ g_2(x) &= \pm \sqrt{8.3^2 - (x - 8.3)^2} \quad x \in [5.39; 10.61] \\ h_2(x) &= \pm \sqrt{8.48^2 - (x - 7.82)^2} \quad x \in [10.61; 16] \end{aligned} \quad (3.2)$$

Aus der Form der Walzen, die die Zahnform darstellen, lässt sich Rückwirkend auf die Signalform schließen. Das Signal ist in Abbildung 3.4 dargestellt. Ein Wert von 0.3 mm entspricht dabei einem

offenen Signal, d.h. es wird Luft in den Spalt eingeblasen. Bei einem Wert von 0 mm findet keine Einblasung statt. In den Graphiken ist ein Signalverlauf für eine viertel Umdrehung der Walze dargestellt. Aufgrund der Symmetrie würde im weiteren ein spiegelverkehrter Verlauf folgen und danach eine periodische Fortsetzung, wie in Abbildung 3.5 dargestellt.

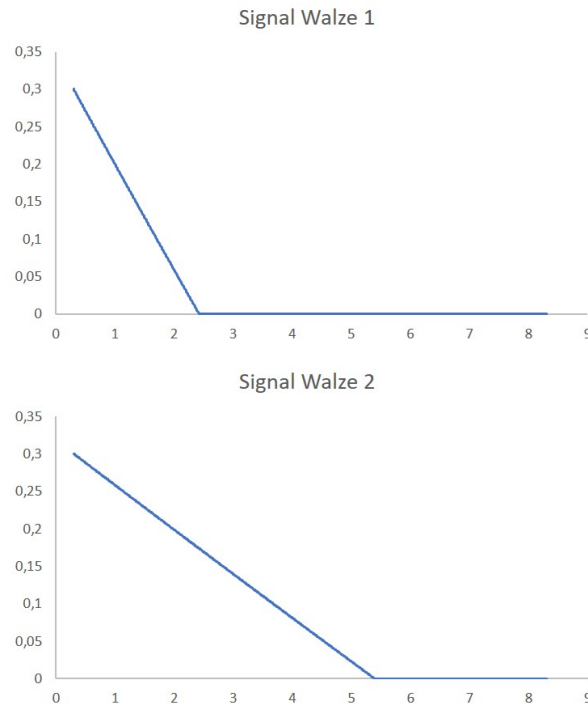


Abbildung 3.4: Signalverlauf der Walzen

Der lineare Verlauf der ersten Walze lässt sich annähern über Gleichung 3.3 und der der zweiten Walze über Gleichung 3.4.

$$l_1(x) = -0.14x + 0.3388 \quad (3.3)$$

$$l_2(x) = -0.059x + 0.31801 \quad (3.4)$$

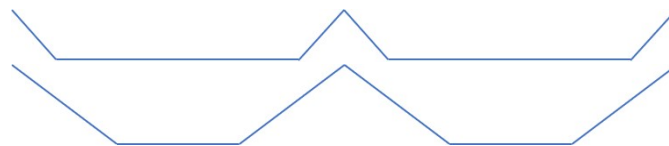


Abbildung 3.5: periodische Signale der Walzen

Als zweites wird im folgenden auf die Entscheidung der Zähneanzahl detaillierter eingegangen. Ein ausschlaggebender Punkt ist dabei, dass die Einblasung mit einer Frequenz in Umgebung der Ablösefrequenz der Strömung durchgeführt wird. Außerdem soll die Drehzahl der Elektromotoren nicht überschritten werden.

Die Ablösefrequenz der Strömung kann über die dimensionslose Strouhal-Zahl berechnet werden. Die Strouhal-Zahl ist definiert als [5]

$$Str = \frac{f * D}{U_{\infty}} \quad (3.5)$$

Hierbei ist f die Ablösefrequenz der Strömung, D die Profildicke im breitesten Querschnitt und U_∞ die Anströmgeschwindigkeit des Windkanals.

Wenn man Gleichung 3.5 nach der gewünschten Variable umstellt (Gleichung 3.6) und die gegebenen Werte aus Tabelle 3.1 einsetzt, erhält man

$$f = \frac{Str * U_\infty}{D} = \frac{0.23 * 18 \text{ m s}^{-1}}{0.0534 \text{ m}} = 77.53 \text{ Hz} \quad (3.6)$$

Parameter	Wert
Strouhal-Zahl	0.23
Anströmgeschwindigkeit	18 m s^{-1}
Profildicke	53.4 mm

Tabelle 3.1: Modellwerte

Aus der Frequenz, die mindestens erreicht werden soll, kann nun berechnet werden, wie schnell sich die Walze mit welcher Zähnezahl drehen muss. Das Ergebnis für unterschiedliche Zähne findet sich in Tabelle 3.2.

Aufgrund von Symmetrie und um dem möglichen entstehen einer Unwucht entgegen zu wirken,

Anzahl der Zähne	Drehgeschwindigkeit der Welle [rpm]
1	77.53
2	155.06
4	310.12
6	465.18
8	620.24
10	775.30

Tabelle 3.2: Zähnezahlen mit zugehörigen Frequenzen

wurde sich für eine gerade Zähnezahl entschieden. In Anbetracht der Tatsache, dass man eine genügend große Lücke zwischen den Zähnen braucht um einen effektiven Luftausstoß zu gewährleisten, wurde sich für eine Zähnezahl von zwei pro Walze entschieden.

Als dritten Aspekt der Zahngestaltung wird im folgendem die Zahnöffnung betrachtet. Es wurden zwei Walzen mit zwei unterschiedlichen duty cyclen gefertigt. Der duty cycle gibt den prozentualen Anteil der Zahnöffnung auf die gesamt mögliche Zahnöffnung (keine Zähne) an. Die Berechnungen des duty cycles für die erste Walze ist über Integration von Gleichung 3.1 und für die zweite Walze von Gleichung 3.2 an einer viertel Walze erfolgt. Für die Berechnungen wurde ein MATLAB Skript geschrieben, das in Abbildung 3.6 aufgeführt ist. Somit ergibt sich für die erste Walze ein duty cycle von 33% und für die zweite von 50%.

```
%Berechnung der Zahnöffnung
%Exzentrizität 1
f=@(x) sqrt((9.15.*9.15)-((x-9.45).*(x-9.45)));
q=integral(f, 0.3, 2.42);

%Exzentrizität 2
%f=@(x) sqrt((8.48.*8.48)-((x-8.48-0.3).*(x-8.48-0.3)));
%q=integral(f, 0.3, 5.39);

%Teil 2
g=@(x) sqrt((8.3.*8.3)-((x-8.3).*(x-8.3)));
r=integral(g, 2.42, 8.3); %Schnittpkt anpassen

%Außenkreis 16,6mm
h=@(x) sqrt((8.3.*8.3)-((x-8.3).*(x-8.3)));
s=integral(g, 0, 8.3);

%Innenkreis 16mm
t = pi.* 8.*8 / 4;

%freie Fläche
zahnf=q+r-t;
spaltf=s-t-zahnf;

prozent = spaltf / (s-t);

%Ausgabe
disp(['Zahnöffnung ' num2str(prozent)]);
```

Abbildung 3.6: MATLAB Skript zur Berechnung der Zahnöffnung

Kapitel 4

Widerstandsbestimmung

Text.

4.1 mathematisches Modell

4.2 Implementierung

Kapitel 5

Windkanalversuche

5.1 Windkanal

5.2 Versuchsaufbau

5.3 Messeinrichtung

5.4 Versuchsdurchführung

Kapitel 6

Versuchsauswertung

6.1 Messdaten

6.2 Vergleich mit Erwartungen

6.3 Vergleich zum Modell ohne Walzen

6.4 Effizienzbetrachtung

Kapitel 7

Fazit

Literaturverzeichnis

- [1] D. Barros, Jacques Borée, Bernd R. Noack, Andreas Spohn, and Tony Ruiz. Bluff body drag manipulation using pulsed jets and coanda effect. *Journal of Fluid Mechanics*, 805:422–459, 2016.
- [2] D. Geropp and H.-J. Odenthal. Drag reduction of motor vehicles by active flow control using the coanda effect. *Experiments in Fluids*, 28(1):74–85, 2000.
- [3] L. Henning. *Regelung abgelöster Scherschichten durch aktive Beeinflussung*. PhD thesis, Technische Universität Berlin, Berlin, 2008.
- [4] W.-H. Hucho. *Aerodynamik der stumpfen Körper: Physikalische Grundlagen und Anwendungen in der Praxis*. Strömungsmechanik. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2., vollst. überarb. und erw. aufl. edition, 2011.
- [5] A. Leder. *Abgelöste Strömungen Physikalische Grundlagen*. Grundlagen und Fortschritte der Ingenieurwissenschaften / Fundamentals and Advances in the Engineering Sciences. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 1992.
- [6] V. J. MODI, M. S. U. K. FERNANDO, and T. YOKOMIZO. Moving surface boundary-layer control - studies with bluff bodies and application. *AIAA Journal*, 29(9):1400–1406, 1991.
- [7] Y. Utturkar, R. Holman, R. Mittal, B. Carroll, M. Sheplak, and L. Cattafesta, editors. *A Jet Formation Criterion for Synthetic Jet Actuators*, volume nos. 2003-0001 to 2003-1143 (with omissions in numbering) of *AIAA papers*, Reston, VA, 2003. American Institute of Aeronautics and Astronautics.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Stumpfkörper mit Ausblasung von Bearman [4]	2
2.2	Stumpfkörper mit Ausblasung von Geropp [2]	3
2.3	Ausblasung von Barros [1]	3
2.4	Truckmodell von Modi [6]	4
2.5	betrachtete Modelle für Auslegung der Regelung [3]	4
3.1	schematische Darstellung des Versuchsmodells	6
3.2	mathematische Funktionen für Zahnform	7
3.3	Querschnitt durch die finalen Walzen	8
3.4	Signalverlauf der Walzen	9
3.5	periodische Signale der Walzen	9
3.6	MATLAB Skript zur Berechnung der Zahnöffnung	11

Tabellenverzeichnis

1.1	Initialien	1
2.1	Widerstandsreduktion bei Modi	4
3.1	Modellwerte	10
3.2	Zähnezahlen mit zugehörigen Frequenzen	10

Anhang A

Technische Zeichnungen (NB, TG)

A

B

C

D

4

4

3

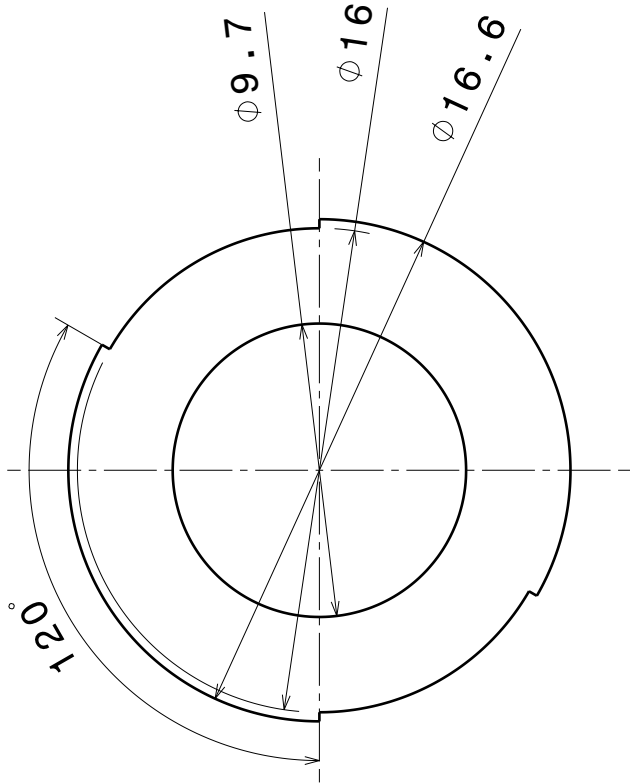
3

2

2

1

1



Seitenansicht rechts
Maßstab: 4:1

(Projektname) D-Shape Model		(zul. Abw.) Allg. Toleranzen DIN ISO 2768-m-K	Maßstab 1:1	
(Tel.-Nr.)		(Benennung) gezahnte Welle 33%	Blatt 1/1	
		Datum 01.11.18	Name Oswald	(Zeichnungsnummer)
		Institut für Strömungsmechanik		
				(Anzahl) 2 Stück

D

A

Anhang B

Messreihe

Text.